DOI: 10.22067/jacsm.2021.69250.1011

بهینه‌سازی سیستم‌های هیبریدی خورشیدی، بادی، باتری با محرک‌های مختلف (موتور دیزل، موتور گازسوز، توربین گازی) *

مقاله پژوهشی

آزاده احمدی[۱] حسن حاج عبداللهی[۲] محمد شفیعی دهج[۳]

چکیده *در این مقاله سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی-باتری با درنظرگرفتن ۳محرک مختلف شامل موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی به‌وسیلهٔ آنالیزهای ساعتی در طول یک سال برای شهر کرمان مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده است. در این مطالعه از نسبت سوخت برای ارزیابی مصرف سوخت سیستم مورد بررسی نسبت به سیستم‌های سنتی استفاده شده است. تعداد پنل خورشیدی، تعداد توربین بادی و تعداد باتری و ظرفیت اسمی موتور دیزل، ظرفیت موتور گازسوز و ظرفیت توربین گازی به‌عنوان متغیرهای طراحی و نسبت سوخت و هزینه سالیانه به‌عنوان توابع هدف درنظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه مقادیر بهینه متغیرهای طراحی از الگوریتم چندهدفه NSGA-II استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان دادند که سیستم هیبریدی با محرک دیزل در مقایسه با ۲سیستم دیگر در محدودهٔ وسیعی از جبههٔ پرتو، دارای بیشترین نسبت سوخت و کمترین هزینه است. نسبت سوخت و هزینهٔ سالیانه در نقطهٔ بهینهٔ نهایی برای محرک دیزل ۰/۷۳۵ و ۱۸۵٤۵۶/۵ ($/year) است. تعداد بهینهٔ پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری برای سیستم هیبریدی با محرک دیزل به‌ترتیب ۱۲۶۶، ۱۹ و ۸۲۲ است و همچنین ظرفیت نامی بهینه محرک دیزل ۱۶۳ کیلووات است.*

واژه‌های کلیدی پنل فتوولتائیک، توربین بادی، باتری، محرک اصلی، هزینهٔ سالیانه، نسبت سوخت

مقدمه

انرژی بزرگ‌ترین چالشی است که امروزه بشر با آن مواجه است. انرژی که روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد از سوختن سوخت‌های فسیلی به‌دست می‌آید [1]. در حقیقت ۸۱درصد انرژی مصرفی جهان از سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، زغال سنگ و گاز تأمین می‌شود که حجم زیادی از گاز $CO2$ را تولید می‌کند [1]. در روش سنتی ژنراتور دیزل در شبکه برق به‌تنهایی استفاده می‌شد که به‌دلیل افزایش قیمت نفت، از نظر اقتصادی منسوخ شد. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی تولید انرژی تجدیدپذیر، امکان استفاده از منابع طبیعی همچون باد و خورشید را فراهم ساخته است. ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر با دیزل و سیستم ذخیرهٔ انرژی را سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی گویند.

روش‌های زیادی برای بهینه‌سازی سیستم‌های خورشیدی- بادی استفاده شد. هو و همکاران [1] روشی را ارائه دادند که هزینهٔ اجرایی و نگهداری سیستم دیزلی بادی را کاهش دهد. اضافه‌کردن منبع ذخیره به سیستم‌های هیبریدی باعث افزایش راندمان این سیستم‌ها می‌شود، بر این اساس باسبو و همکاران [2] تخمین اقتصادی اولیه برای سوخت سالیانهٔ سیستم هیبریدی بادی پنوماتیکی دیزلی ارائه کردند. دیاب و همکاران [3] بر اساس بار ورودی، هزینه و جزئیات تخصصی تجهیزات، منابع باد و خورشید به بهینه‌سازی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۳/۲۷می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، ایران
(۲) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، ایران
(۳) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، ایران
Email: m.shafiey@vru.ac.ir

سیستم هیبریدی پرداختند. این سیستم بهینه، از نظر سازگاری با محیط زیست نسبت به سیستم دیزلی به‌علت کاهش گازهای گلخانه ای بسیار مورد توجه قرار گرفت. اولد بیلال و همکاران [4] با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه به بهینه‌سازی سیستم هیبریدی خورشید- باد- دیزل-باتری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای همهٔ پروفیل‌های بار، هزینهٔ انرژی و تولید CO_2 کاهش یافت. اولد بیلال و همکاران [5] در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از داده‌های تابش خورشید، دما و سرعت باد در ایستگاه گاندون، بهینه‌سازی سیستم را انجام دادند. برای غلبه بر مشکل نوسانی‌بودن انرژی باد، یونا و صابر [6] طرح کنترل نوسانی یک سیستم توان کوچک به‌روش کنترل مختصاتی ژنراتور توربین باد و سیستم ذخیرهٔ انرژی باتری را ارائه دادند. مری و همکاران [7] مدلی برای بهینه‌سازی سیستم‌های هیبریدی متشکل از پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر و ژنراتور دیزل به‌عنوان توان کمکی و باتری برای ذخیرهٔ انرژی ارائه دادند. نتایج نشان داد که استفاده توأم از باتری و انرژی‌های تجدیدپذیر از نظر اقتصادی و زیست‌شناسی بهینه است. کللوگ و همکاران [8] اجزای سیستم مستقل تولید برق خورشیدی بادی و سیستم هیبریدی خورشیدی بادی را با استفاده از داده‌های میانگین ساعتی سرعت باد و تابش خورشید بهینه‌سازی کردند. گان و همکاران [9] با استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی خطی به بهینه‌سازی سیستم هیبریدی بادی دیزلی پرداختند. کالدلیس [10] روش محاسبهٔ هزینهٔ تولید برق بلندمدت برای سیستم هیبریدی بادی دیزلی را پیشنهاد داد. ساها [11] الگوریتمی را برای سیستم هیبریدی بادی دیزلی پیشنهاد داد که باتوجه‌به شرایط تعادلی توان کلی سیستم بهینه‌سازی شد.

در این مقاله سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی-باتری- به‌همراه محرک‌های اولیهٔ مختلف مدل‌سازی و سپس بهینه‌سازی شده است. برای این منظور از ۳محرک مختلف شامل موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی استفاده شده و نتایج هرکدام از این محرک‌ها به‌صورت جداگانه بررسی شده است. تعداد پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری و ظرفیت نامی موتور محرک‌های اصلی به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. برای بهینه‌سازی از ۲تابع هدف هزینه و نسبت سوخت استفاده شده است. نسبت سوخت به‌صورت یک تابع هدف نو، تعریف شده است. به‌طوری‌که انحراف مصرف سوخت در این سیستم پیشنهادی نسبت به یک سیستم کاملا تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای دقت قابل قبول، تمامی تحلیل‌ها به‌صورت ساعتی در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی

پنل خورشـــیدی. توان تولیدی یک پنل خورشـــیدی نه‌تنها به قدرت تشعشع خورشید بلکه به زاویهٔ بین پنل و پرتو خورشید بستگی دارد. تشعشع کلی روی سطح شیبدار تابعی از تابش مستقیم و پراکنده است که شامل تشعشع مستقیم خورشید، تابش پراکنده هم سانگرد خورشید، تشعشع‌پخشی از افق و تشعشع انعکاسی از اطراف به‌روی سطح است که به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود [12]:

$$\dot{I}_t = \left(\dot{I}_b + \dot{I}_d \frac{\dot{I}_b}{\dot{I}_h}\right) R_b + \dot{I}_d \left(1-\frac{\dot{I}_b}{\dot{I}_h}\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\left(1+\sqrt{\dot{I}_b/\dot{I}_h}\,\sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) + \dot{I}_h \rho_g \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه $\dot{I}_b$، $\dot{I}_d$، $\dot{I}_h$، R_b، β و ρ_g به‌ترتیب تابش مســتقیم، تابش پراکنده، مجموع تابش مســتقیم و پراکنده، نسبت تابش کلی روی سطح شیبدار به تابش روی سطح افقی، زاویهٔ شیب سطح و ضریب انعکاس

محیط اطراف است. جزئیات مربوط به محاسبهٔ تشعشع مستقیم و پراکنده به مرجع [13] ارجاع داده می‌شود.

توان کلی خروجی یک پنل خورشیدی با رابطهٔ زیر تخمین زده می‌شود [14]:

$$P_{pv} = ff\left(V_{oc-real} \times I_{sc-real}\right) \tag{۲}$$

که $V_{oc-real}$ و $I_{sc-real}$ به‌ترتیب ولتاژ و جریان تولیدی پنل تحت شرایط واقعی است و ff ضریب تصحیح به‌صورت زیر است:

$$ff = P_{max}/V_{oc}I_{sc} \tag{۳}$$

در رابطهٔ فوق P_{max}، V_{oc} و I_{sc} به‌ترتیب حداکثر توان خروجی، ولتاژ و جریان تولیدی پنل خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی هستند. قابل ذکر است که این مقادیر از سوی شرکت سازنده مشخص می‌شود. $V_{oc-real}$ و $I_{sc-real}$ از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است [14]:

$$V_{oc-real} = V_{oc} + f_{Voc-T} \times T_c \tag{٤}$$

$$I_{sc-real} = \left[I_{sc} + f_{Isc-T}\left(T_c - T_{std}\right)\right]\left(I_t/G_{std}\right) \tag{٥}$$

که f_{Voc-T} و f_{Isc-T} ضرایب تصحیح دما برای ولتاژ و جریان است. T_{std} دما در شرایط استاندارد و T_c دمای سطح پنل خورشیدی است. f_{Voc-T}، f_{Isc-T}، T_{std} و G_{std} به‌وسیلهٔ شرکت سازندهٔ پنل خورشیدی مشخص می‌شوند.

توربین بادی. با استفاده از رابطه زیر می‌توان توان خروجی توربین بادی را تخمین زد [15]:

$$P_{tur} = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad V < V_c \\ P_{tur}\left(\dfrac{V^n - V_c^n}{V_r^m - V_c^n}\right) & \text{if} \quad V_c < V < V_r \\ P_{er} & \text{if} \quad V_c < V < V_f \end{cases} \tag{٦}$$

که P_{er} توان نسبی ژنراتور بادی است. همچنین V_c، V_r و V_f به‌ترتیب سرعت قطع پایین (سرعتی که در آن توربین شروع به کار می‌کند یا متوقف می‌شود)، سرعت نامی توربین (سرعت بهینه‌ای که توربین به‌ازای آن طراحی شده است) و سرعت قطع بالا (سرعتی که به‌ازای آن، توربین باید باتوجه‌به تنش های به‌وجودآمده متوقف شود) است. برای آنالیز توان اغلب m=2 را در نظر می‌گیرند [15].

باتری .به‌علت عملکرد تصادفی پنل‌های خورشیدی و توربین بادی، ظرفیت باتری در سیستم هیبریدی خورشید-باد-باتری مرتبا تغییر می‌کند. در این سیستم سطح شارژ باتری از طریق روابط (۷ و ۸) محاسبه می‌شود:

هنگامی که مجموع توان پنل‌های خورشیدی و توربین بادی از بار مورد نیاز بیشتر باشد، باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد که این مقدار از رابطهٔ زیر تخمین زده می‌شود [16].

$$\begin{aligned} P_{Bat}(t) &= P_{Bat}(t-1)\times(1-\sigma) + \\ &\left(P_{pv}(t)\eta_{Inv}\eta_{Inv}^2 - P_{dmn}(t)/\eta_{Inv}\right)\times\eta_{Bat} \end{aligned} \tag{۷}$$

هنگامی که مجموع توان خروجی پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی از بار مورد نیاز کمتر باشد، باتری در حالت تخلیه قرار می‌گیرد. در این مقاله، بازده تخلیهٔ باتری یک فرض شده است [16]. مقدار شارژ باتری در زمان t از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است [16].

$$\begin{aligned} P_{Bat}(t) &= P_{Bat}(t-1)\times(1-\sigma) - \\ &\left(-P_{pv}(t)\eta_{Inv} - P_{WT}(t)\eta_{Inv}^2 - P_{dmn}(t)/\eta_{Inv}\right)\times\eta_{Inv} \end{aligned} \tag{۸}$$

در این روابط $P_{dmn}(t)$ و $P_{Bat}(t-1)$ مقدار شارژ باتری در زمان t و t-1 است. σ نرخ تخلیه شارژ خودکار ساعتی، η_{Inv} بازده اینورتر، P_{dmn} بار موردنیاز و η_{Bat} بازده شارژ باتری هستند.

قابل ذکر است که اگر مجموع توان پنل های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری از بار مورد نیاز بزرگ‌تر نباشد، توان مورد نیاز از محرک موتور دیزل (موتور گازسوز، توربین گازی) تأمین می‌شود که در قسمت‌های بعد مدل‌سازی هر محرک ارائه شده است.

محرک‌های اصلی. در این پژوهش محرک‌های مورد بررسی شامل موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی هستند که هر کدام به‌صورت جداگانه مدل‌سازی شده‌اند.

موتور دیزل. در روابط زیر توابع بازده گرمایی و نرخ جریان جرمی سوخت بر حسب متغیر PL که بار جزئی اولیه به‌عنوان درصدی از بار نامی است، بیان می‌شوند.
بازده گرمایی برای موتور دیزل به‌ازای بارهای جزئی مختلف به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [17]:

$$\frac{\eta_{D,PL}}{\eta_{D,nom}} = 1.07\exp\left(-0.0005736(PL)\right) - 1.259\exp\left(-0.05367(PL)\right) \quad (٩)$$

نرخ جریان جرمی سوخت محرک اولیه تابع نرخ جریان جرمی سوخت در بار نامی است [17]:

$$\frac{\dot{m}_{f,PL}}{\dot{m}_{f,nom}} = -0.02836\exp\left(0.03254(PL)\right) + 0.2556\exp\left(0.01912(PL)\right) \quad (١٠)$$

موتور گازسوز. بازده گرمایی و نرخ جریان جرمی سوخت برای موتور گازسوز به‌صورت زیر بیان می‌شود : [17]

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{nom}} = -0.0001591(PL)^2 + 0.024(PL) + 0.1904 \quad (١١)$$

$$\frac{\dot{m}_{f,PL}}{\dot{m}_{f,nom}} = 0.2408\exp\left(0.01403(PL)\right) + 0.03553\exp\left(-0.02494(PL)\right) \quad (١٢)$$

توربین گازی. برای توربین گازی بازده و نرخ جریان جرمی به‌صورت زیر است [17]:

$$\frac{\eta_{PL}}{\eta_{nom}} = \frac{-0.002551(PL)^2 + 1.135(PL) + 11.71}{100} \quad (١٣)$$

$$\frac{\dot{m}_{f,PL}}{\dot{m}_{f,nom}} = 0.4772\exp\left(0.007565(PL)\right) - 0.21236\exp\left(-0.02677(PL)\right) \quad (١٤)$$

توان تولیدی هر محرک از رابطه زیر به‌دست می‌آید [17]:

$$\dot{W} = \eta \dot{m}_f LHV \quad (١٥)$$

که η، $\dot{m}_f$ و LHV به‌ترتیب بازده توان تولیدی، نرخ جریان جرمی سوخت و ارزش حرارتی پایین سوخت برای هر محرک تعریف می‌شوند.

تحلیل اقتصادی

هزینهٔ سالیانهٔ کلی سیستم هیبریدی مورد مطالعه شامل هزینهٔ تجهیزات (توربین بادی، پنل خورشیدی، باتری، اینورتر، موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی)، هزینهٔ تعمیرات و نگهداری، هزینهٔ سوخت محرک و هزینهٔ زیست‌محیطی مربوط به آلاینده‌های تولیدی توسط محرک‌ها است و به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$TAC(\$/year) = aC_{in} + C_m + C_f + C_{env} \quad (١٦)$$

$$C_{in} = n_1C_{PV} + n_2C_{WT} + n_3C_{Bat} + n_4C_{inv} + C_{mover} \quad (١٧)$$

$$C_m = n_1C_{PV,m} + n_2C_{WT,m} + C_{mover,m} \quad (١٨)$$

$$C_f = \dot{m}_f \times \tau_{mover} \times 3600 \times \varphi_f \quad (١٩)$$

$$C_{env} = \dot{m}_{CO_2} \times \tau_{mover} \times 3600 \times \psi_{CO_2} \quad (٢٠)$$

$$C_{Diesel} = \left(-138.71 \times \ln\left(\dot{W}\right) + 863.5\right)\dot{W} \quad (٢١)$$

$$C_{Gasengine} = \left(-138.71 \times \ln\left(\dot{W}\right) + 1727.1\right)\dot{W} \quad (٢٢)$$

$$C_{Gasturbine} = \left(-0.014\dot{W} + 600\right)\dot{W} \quad (٢٣)$$

در روابط فوق $\dot{W}$ توان تولیدی مختص هر محرک است. n_1، n_2 ، n_3 و n_4 به‌ترتیب تعداد پنل خورشیدی، تعداد توربین بادی، تعداد باتری و اینورتر است. همچنین C_{PV}، C_{WT}، C_{Bat}، C_{inv} و C_{mover}

قیمت واحد پنل خورشـــیدی، توربین بادی، باتری، اینورتر و محرک مورد نظر اســـت. $C_{PV,n}$، $C_{WT,m}$ و $C_{mover,m}$ قیمـت واحـد تعمیرات و نگهـداری پنـل خورشـــیدی، توربین بادی و محرک مورد نظر اســـت. نهایتا τ_{mover}، φ_f، $\dot{m}_{CO_2}$ و ψ_{CO_2} معرف ســـاعات عملکرد محرک در سـال، قیمت واحد سـوخت محرک مورد نظر، نرخ تولید CO_2 و هزینهٔ انتشار CO_2.

در رابطهٔ زیر a ضـــریب هزینهٔ ســـالیانه تعریف می‌شود [18]:

$$a = \frac{i}{1-(1+i)^{-y}} \qquad (٢٤)$$

که i و y به‌ترتیب نرخ تورم و عمر دستگاه بر حسب سال است.

قابل ذکر است که بعضی از تجهیزات سیستم خورشیدی–بادی–باتری در حین پروژه احتیاج به تعویض دارد. در این مقاله طول عمر باتری ٥سال در نظر گرفته شده است. در نتیجه هزینهٔ باتری به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$C_{Bat} = P_{Bat}\left(1+\frac{1}{(1+i)^5}+\frac{1}{(1+i)^{10}}+\frac{1}{(1+i)^{15}}\right) \qquad (٢٥)$$

در رابطهٔ فوق C_{Bat} ارزش کنونی باتری و P_{Bat} قیمت باتری است. طول عمر اینورتر نیز ١٠سال در نظر گرفته شـــده اســـت. در نتیجه هزینهٔ اینورتر به‌صـــورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$C_{Inv} = P_{Inv}\left(1+\frac{1}{(1+i)^{10}}\right) \qquad (٢٦)$$

C_{Inv} ارزش کنونی اینورتر و P_{Inv} قیمت اینورتر است.

تابع هدف، پارامترهای طراحی و قیود. در این مقاله هزینهٔ کلی سالیانهٔ (TAC) سیستم که در معادلهٔ (١٦) بیان شد، به‌عنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفته شد. بدیهی است که همواره در سیستم‌های مختلف انرژی، هزینه از مهم‌ترین مشخصه‌های بهینه‌سازی است. از آن‌جایی که معمولا هزینهٔ سیستم‌های تجدیدپذیر بالاست، بعد از بهینه‌سازی احتمالا الگوریتم بهینه‌ساز تعداد پانل‌های خورشیدی، توربین بادی و حتی باتری را صفر در نظر بگیرد و تمام بار مورد نیاز توسط محرک تأمین شود. بنابراین برای عمومیت‌بخشیدن به نتایج، میزان سوخت مصرفی نیز باید مدنظر قرار گیرد. از این رو، نسبت سوخت به‌عنوان دومین تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FR(-) = \left(M_{f,Trad} - M_{f,Hyb}\right)/M_{f,Trad} \qquad (٢٧)$$

که در آن مقادیر $M_{f,Hyb}$ و $M_{f,Trad}$ به‌ترتیب مصرف سوخت سالیانه در سیستم هیبریدی مدنظر و در سیستم سنتی (سیستمی که تنها مولد برق در آن موتور دیزل یا موتور گازسوز یا توربین گازی است) در نظر گرفته شده است. در این سیستم همواره $M_{f,Hyb}<M_{f,Trad}$ بوده و باتوجه‌به این تعریف همواره بین صفر تا یک خواهد بود و مقادیر بزرگ‌تر آن مطلوب‌تر هستند. به بیان دیگر، مقدار نسبت سوخت صفر به‌معنای این است که مصرف سوخت سیستم با سیستم‌های سنتی (فقط محرک) یکسان است و بنابراین سیستم هیبریدی هیچ سهمی از انرژی تجدیدپذیر ندارد. در مقابل، نسبت سوخت یک به‌معنای این است که میزان مصرف سیستم پیشنهادی صفر است و انرژی مورد نیاز تماما از طریق سیستم تجدیدپذیر تأمین می‌شود.

مصرف سوخت سالیانه در سیستم سنتی ($\boldsymbol{M_{f,Trad}}$) به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$M_{f,Trad} = \sum_{i=1}^{8760}\left(\dot{m}_{f,PL} \times 3600\right)_i \qquad (٢٨)$$

که $\dot{m}_{f,PL}$ مصرف سوخت بار جزئی در محرک مدنظر ا ست با ظرفیت ا سمی برابر با حداکثر بار مورد نیاز که باتوجه‌به محرک از روابط (١٠، ١٢ و ١٤) محاسبه شده

است.

در این مقاله تعداد پنل خور شیدی، توربین بادی و باتری و ظرفیت نامی موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی به‌عنوان متغیرهای طراحی درنظر گرفته شده‌اند. در سیستم‌های هیبریدی مورد مطالعه در هر زمانی، مقدار شارژ باتری باید در محدودهٔ $P_{Bat,min}$- $P_{Bat,max}$ باشد. مقدار شارژ حداکثر باتری، مقدار ظرفیت اسمی باتری است و حداقل مقدار شارژ باتری توسط حداکثر عمق تخلیه (DOD) مشخص می‌شود [19]:

$$P_{Bat,min} = (1 - DOD) P_{Bat,max} \quad (٢٩)$$

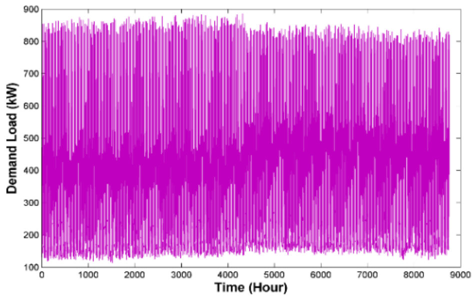
الگوریتم NSGA-II

مسائل بهینه‌سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه‌سازی، به ۲نوع تقسیم‌پذیر هستند: مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه و مسائل بهینه‌سازی چندهدفه. در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، هدف از حل مسئله بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن، کیفیت پاسخ به‌دست‌آمده را به‌طور کامل منعکس می‌کند. اما در برخی موارد نمی‌توان صرفا با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مسئله بهینه‌سازی را امتیازدهی کرد. در این نوع مسائل، ناگزیریم که چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد را تعریف و هم‌زمان، مقدار همه آن‌ها را بهینه کنیم.

الگوریتم فراابتکاری NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف به اثبات رسیده است. دب و همکارانش در سال ۱۹۹۵ روش بهینه‌سازی NSGA را برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه معرفی کردند [20]. در این مطالعه، از نسخهٔ توسعه‌دادهشدهٔ این الگوریتم توسط نویسندگان که در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده، استفاده شده است.

مطالعه موردی

سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی-باتری به‌همراه محرک موتور دیزل یا موتور گازسوز یا توربین گازی برای شهر کرمان، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده است. سیستم باید بار الکتریکی موردنیاز که در شکل (۱) نشان داده شده است را تأمین کند[21] نرخ تورم و طول عمر کلی سیستم به‌ترتیب ۱۰درصد و ۱۵سال و قیمت سوخت برای موتور دیزل $0.16\$/kg$ و برای موتور گازسوز و توربین گازی $0.12\$/kg$ در نظر گرفته شده است. قیود و پارامترهای ورودی در جدول (۱) لیست شده‌اند.



شکل ۱ تغییرات بار الکتریکی مورد نیاز [21]

جدول ۱ قیود و پارامترهای ورودی برای بهینه‌سازی [19]

پارامترها	مقادیر
سرعت قطع پایین توربین (m/s)	۲/۵
سرعت قطع بالا توربین (m/s)	۱۳
سرعت نامی توربین (m/s)	۱۱
نرخ تخلیهٔ خودکار ساعتی (-)	۰/۰۰۰۲
عمق تخلیه (-)	۰/۸
هزینهٔ آلاینده‌ها ($/kg)	۰/۰۲۰۸٦
ظرفیت اسمی پنل خورشیدی (kW)	۰/۲٤
ظرفیت اسمی توربین بادی (kW)	۱۰
قیمت واحد پنل خورشیدی ($)	٦۱٤
قیمت واحد توربین بادی ($)	۳۲۰۰
بازده شارژ باتری (-)	۰/۸۵
بازده تخلیهٔ باتری (-)	۱
بازده اینورتر (-)	۰/۹۵

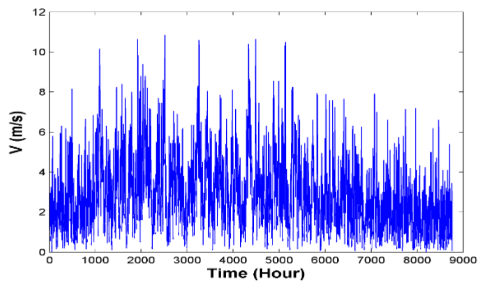
نتایج و بحث

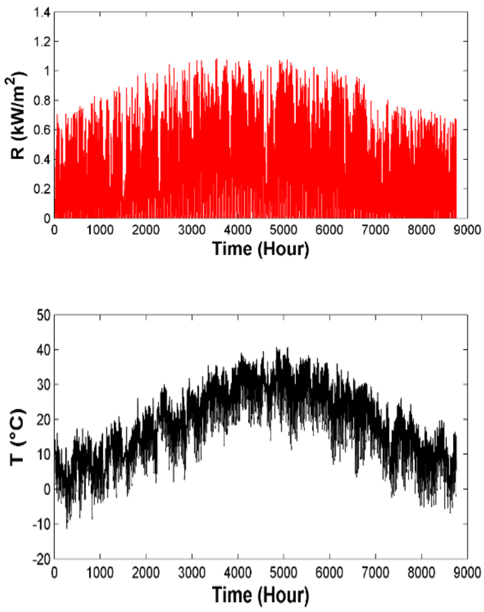
در این تحقیق، هزینهٔ کلی سالیانه و نسبت سوخت به‌عنوان ۲تابع هدف در نظرگرفته شده‌اند. تعداد پنل‌های خورشیدی، تعداد توربین بادی، تعداد باتری، ظرفیت موتور دیزل، ظرفیت موتور گازسوز و ظرفیت توربین گازی به‌عنوان پارامترهای طراحی و محدودهٔ تغییرات آن‌ها در جدول (۲) لیست شده است. مقادیر پایین تمامی متغیرها، حداقل مقدار ممکن در نظر گرفته شده است که برای اکثر متغیرها صفر لحاظ شده است. همچنین باتوجه‌به مقدار بار مورد نیاز نشان‌داده‌شده در شکل (۱)، حد بالای متغیرها نیز تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال، باتوجه‌به اینکه بیشینه بار مورد نیاز کمتر از 900kW است، حداکثر بار محرک 1000kW در نظر گرفته شده است.

دمای ساعتی محیط، سرعت باد و تشعشع خورشید در طول یک‌سال در شکل (۲) نشان داده شده که از مرکز هواشناسی جمع‌آوری شده است. همچنین میانگین سالانهٔ داده‌های محیطی شامل سرعت باد، تشعشع خورشید و دمای محیط برای شهر کرمان در جدول (۳) آمده است [21].

جدول ۲ متغیرهای طراحی و محدودهٔ تغییرات آن‌ها

	محدودهٔ پایین	محدودهٔ بالا
تعداد پنل خورشیدی (-)	۰	۸۰۰۰
تعداد توربین بادی (-)	۰	۵۰۰
ظرفیت اسمی محرک‌ها (kW)	۵۰	۱۰۰۰
تعداد باتری (-)	۰	۲۰۰۰





شکل ۲ تغییرات سرعت باد، تشعشع خورشید و دمای محیط در طول یک سال [۲۲]

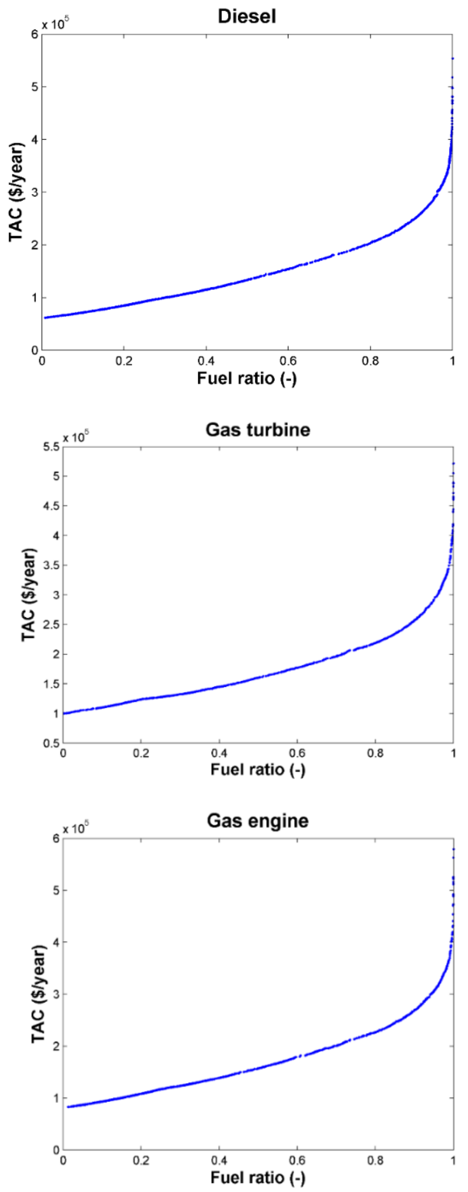
جدول ۳ میانگین سالیانهٔ داده‌های محیطی [22]

دمای محیط (°C)	تشعشع خورشید (kW/m^2)	سرعت باد (m/s)
۱۷/۰۹	۰/۲۱۹	۲/۷۶۸

برای بهینه‌سازی هزینهٔ سالیانه و نسبت سوخت از الگوریتم چندهدفه NSGA-II با تعداد تکرار ۱۰۰ استفاده شده است. نتایج جبههٔ پرتو بهینه برای محرک‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. بهترین نتیجه برای موردی است که هزینهٔ سالیانهٔ کمتر و نسبت سوخت بالاتری داشته باشد. باتوجه‌به نمودارهای شکل (۳) با افزایش نسبت سوخت، هزینهٔ سالیانه افزایش می‌یابد. افزایش نسبت سوخت به این معناست که سیستم مدنظر به‌سمت تولید توان بدون استفاده از محرک پیش می‌رود. از طرفی سیستم بایستی با افزایش تعداد پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری توان مورد نیاز خود را تأمین کند که باعث افزایش هزینه می‌شود و با نزدیک‌شدن به مقدار نسبت سوخت یک، هزینهٔ سالیانه با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. این

درحالی است که تغییرات نسبت سوخت بسیار ناچیز است.

نتایج بهینه نسبت سوخت و هزینهٔ سالیانه و مقادیر مربوط به پارامترهای طراحی برای نقطهٔ بهینهٔ نهایی در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۳ جبههٔ پرتو بهینه برای محرک‌های مختلف

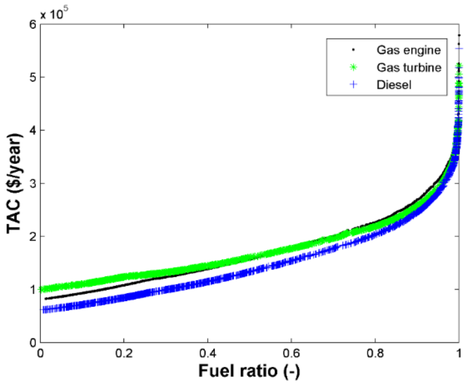
جدول ۴ مقادیر بهینهٔ پارامترهای طراحی با توابع هدف برای نقطهٔ بهینهٔ نهایی برای محرک‌های مختلف

	موتور گازسوز	توربین گازی	دیزل
نسبت سوخت (-)	۰/۷۰۸	۰/۷۷۷	۰/۷۳۵
هزینهٔ سالیانه (($/year)	۲۰۲۴۵۷/۸	۲۱۲۹۱/۹ ۰	۱۸۵۴۵۶/۵
تعداد پنل خورشیدی (-)	۱۱۲۹	۱۳۹۰	۱۲۶۶
تعداد توربین بادی (-)	۳۱	۲۴	۱۹
ظرفیت نامی (kW)	۱۶۴	۱۶۴	۱۶۳
تعداد باتری (-)	۸۱۴	۹۱۰	۸۲۲

همان‌طور که از جدول (۴) مشخص است، موتور دیزل در مقایسه با موتور گازسوز و توربین گازی با هزینهٔ سالیانه ۱۸۵۴۵۶/۵، کمترین مقدار هزینهٔ سالیانه را داراست. برای مقایسهٔ بهتر، جبهه‌های پرتو مختلف در شکل (۳) در شکل (۴) به‌صورت هم‌زمان نشان داده شده است. نتایج بهینه سازی نشان می‌دهد که سیستم هیبریدی با محرک دیزل در مقایسه با ۲سیستم دیگر در محدودهٔ وسیعی از جبهه پرتو (حدود ۹۹/۷۴درصد)، دارای بیشترین نسبت سوخت و کمترین هزینه است. تعداد بهینهٔ پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری برای سیستم هیبریدی با محرک دیزل به‌ترتیب ۱۲۶۶، ۱۹ و ۸۲۲ است و همچنین ظرفیت نامی بهینهٔ محرک دیزل ۱۶۳ کیلووات است.

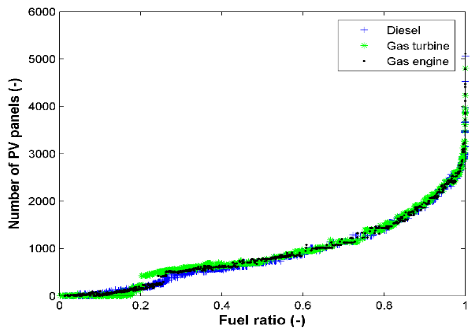
همان‌طور که از شکل (۴) پیداست، سیستم با محرک موتور دیزل در مقایسه با سیستم با محرک موتور گازسوز و توربین گازی دارای کمترین مقدار هزینهٔ سالیانه و بیشترین مقدار نسبت سوخت است. برای نسبت سوخت کمتر از ۰/۵۷۵۹، سیستم با محرک موتور گازسوز غالب بر سیستم با محرک توربین گازی است.

به این معنی که نسبت سوخت بیشتر و هزینهٔ سالیانه کمتر را داراست، اما برای مقادیر بیشتر از این نسبت سوخت حالت عکس اتفاق افتاده است.

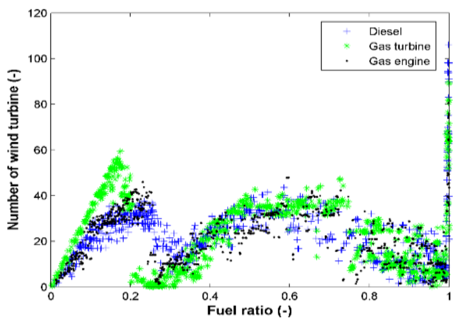


شکل ٤ جبههٔ پرتو بهینه برای محرک‌های مختلف در یک نمودار

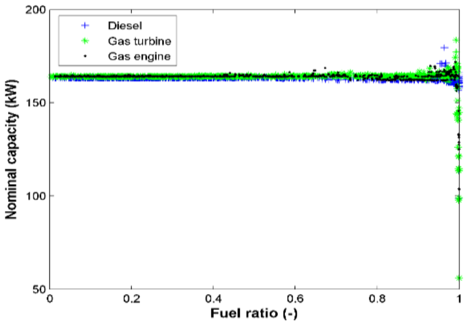
(الف)



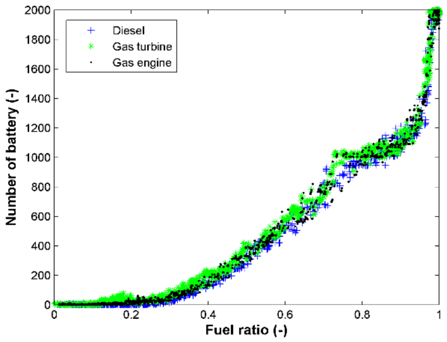
(ب)



(ج)

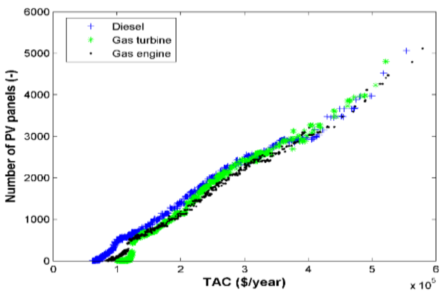


(د)

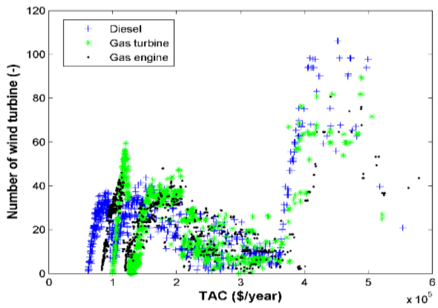


شکل ۵ توزیع پارامترهای طراحی باتوجه‌به جبههٔ پرتو برای نسبت سوخت. (الف) تعداد پنل خورشیدی (ب) تعداد توربین بادی (ج) ظرفیت اسمی (د) تعداد باتری

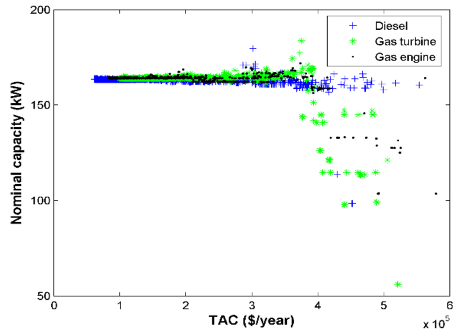
(الف)



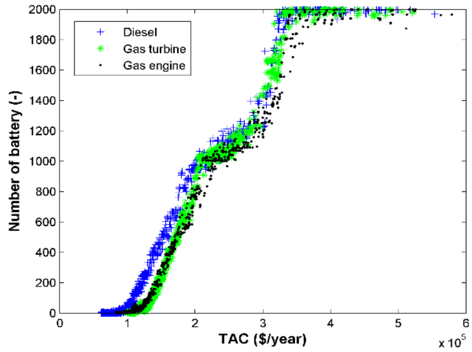
(ب)



(ج)

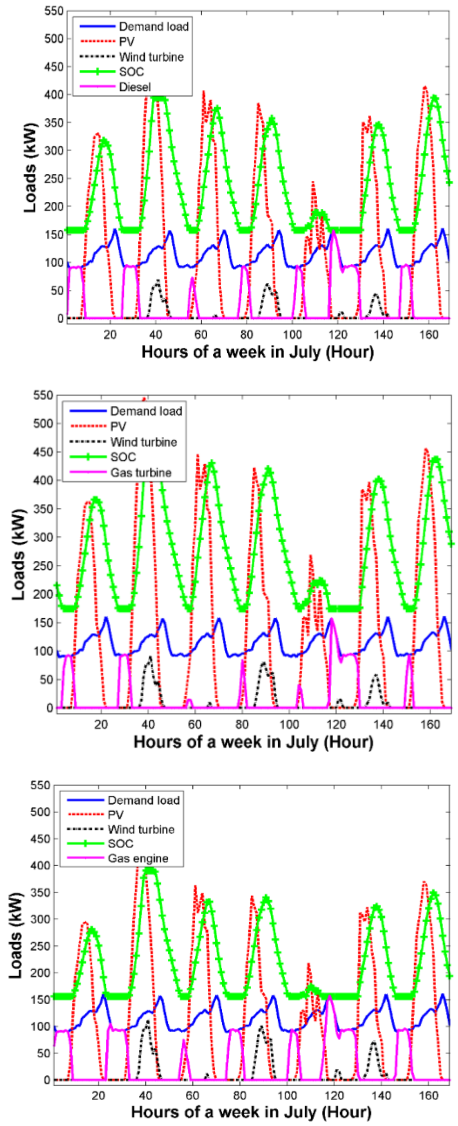


(د)



شکل ٦ توزیع پارامترهای طراحی باتوجه‌به جبهۀ پرتو برای هزینۀ کلی سالیانه. (الف) تعداد پنل خورشیدی (ب) تعداد توربین بادی (ج) ظرفیت اسمی (د) تعداد باتری

باتوجه‌به شکل‌های (٥-الف) و (٦-الف) با افزایش تعداد پنل خورشیدی برای همۀ محرک‌ها، نسبت سوخت و هزینۀ سالیانه افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد پنل خورشیدی، توان خروجی پنل‌های خورشیدی افزایش می‌یابد، در نتیجه باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد و کمبود توان را تأمین می‌کند. به این ترتیب سوخت کمتری به‌وسیلۀ هر محرک مصرف می‌شود و نهایتا منجر به افزایش نسبت سوخت می‌شود. این در حالی اتفاق می‌افتد که با افزایش تعداد پنل خورشیدی، با افزایش هزینه مواجه می‌شویم. تعداد پنل خورشیدی که نیاز است تا به نسبت سوخت یک رسید، برای موتور دیزل ۲۸۹٦، موتور گازسوز ۳۰۹٦ و توربین گازی ۳۰۱۳ است. به همین شکل برای نسبت سوخت یک، تعداد توربین بادی برای موتور دیزل ۲۸، موتور گازسوز ٦٤ و توربین گازی ٦۳ است. باتوجه‌به شکل (٥-ج) با افزایش نسبت سوخت، ظرفیت نامی محرک‌ها کاهش می‌یابد. افزایش نسبت سوخت همراه با تولید توان با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که منجر به کاهش استفاده از محرک‌ها می‌شود؛ پس ظرفیت محرک‌ها کاهش می‌یابد. علی‌رغم انتظار مقدار ظرفیت نامی محرک صفر برای نسبت سوخت یک، باید شرایط خاصی را که تشعشع خورشید یا انرژی بادی وجود نداشته باشد، درنظر گرفت و مقدار ظرفیت مینیمی را برای محرک‌ها در این شرایط فرض کرد تا کمبود توان را تأمین کند. همان‌طور که در شکل (٦-ج) قابل مشاهده است، برای محرک توربین گازی در ظرفیت‌های نامی بزرگ‌تر از ٥٦/۰۳ کیلووات و برای محرک موتور گازسوز در ظرفیت‌های نامی بزرگ‌تر از ۱۰۳/۷کیلووات، با افزایش ظرفیت اسمی هزینۀ سالیانه کاهش می‌یابد و در نهایت در محدودۀ وسیعی از مقادیر هزینۀ سالیانه، ظرفیت نامی تمامی محرک‌ها در محدودۀ (۱٦٤-۱٦۳) کیلووات ثابت می‌ماند. باتوجه‌به شکل (٦-د) با افزایش تعداد باتری در بیشتر نقاط، موتور دیزل در مقایسه با سایر محرک‌ها هزینۀ سالیانه کمتری دارد. باتوجه‌به شکل (٥-د) با افزایش تعداد باتری، نسبت سوخت افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد باتری، امکان ذخیره‌شدن توان اضافی تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی افزایش می‌یابد در نتیجه سیستم به‌سمت تولید توان بدون استفاده از محرک‌ها پیش می‌رود و این به این معناست که نسبت سوخت افزایش می‌یابد. باتوجه‌به شکل (٦-د) تعداد باتری برای رسیدن به نسبت سوخت یک، برای محرک‌های مختلف به بیش از ۲۰۰۰ می‌رسد. تغییرات ساعتی توان تولیدی با پنل خورشیدی، توربین بادی، دیزل (توربین گازی ، موتور گازسوز)، توان مورد نیاز و شارژ و تخلیۀ باتری در نقطۀ بهینۀ نهایی، در طول یک هفته برای ماه جولای به‌عنوان نمونه در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷ تغییرات ساعتی بار مورد نیاز، توان پنل خورشیدی، توان توربین بادی، توان باتری و محرک موردنظر در طول یک هفته در ماه جولای برای نقطهٔ بهینهٔ نهایی

باتوجه‌به شـــکل (۷) برای همهٔ محرک‌ها به‌علت فا صلهٔ زیاد بین حداکثر توان تولیدی پنل خور شیدی و زمان پیک بار مورد نیاز، الکتریســـیتهٔ اضـــافی برای ساعت‌ها ذخیره می شود اما برای محرک توربین گازی، توان تولیدی پنل خورشــیدی و به همین نســبت سـطح شارژ باتری بیشتر از سایر محرک‌هاست و زمان کمتری صــرف تخلیهٔ شــارژ باتری می‌شــود؛ پس تعداد باتری بیشتری نیاز است تا بار اضافی را ذخیره کند و باتوجه‌به بیشتربودن توان خورشیدی برای این محرک، تعداد پنل خورشــیدی بیشــتری نیاز اســت و در نتیجه هزینهٔ کلی برای این محرک بیشتر از سایر محرک‌هاست.

جمع‌بندی

در این مقاله سیستم هیبریدی خورشیدی-بادی-باتری با محرک‌های مختلف شامل موتور دیزل، موتور گازسوز و توربین گازی با الگوریتم چندهدفه NSGA-II بهینه‌سازی شد تا محرک مناسب برای سیستم هیبریدی با بیشترین بازده انتخاب شود. نسبت سوخت و هزینهٔ سالیانه به‌عنوان توابع هدف و تعداد پنل خورشیدی، تعداد توربین بادی، تعداد باتری، ظرفیت اسمی هر محرک به‌عنوان پارامترهای طراحی درنظرگرفته شده‌اند که نتایج به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

- سیستم هیبریدی با محرک دیزل در مقایسه با ۲سیستم دیگر در محدودهٔ وسیعی از جبههٔ پرتو (حدود ۹۹/۷۴درصد)، دارای بیشترین نسبت سوخت و کمترین هزینه است.
- تعداد بهینهٔ پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری برای سیستم هیبریدی با محرک دیزل به‌ترتیب ۱۲۶۶، ۱۹ و ۸۲۲ است و همچنین ظرفیت نامی بهینهٔ محرک دیزل ۱۶۳ کیلووات است.
- برای نسبت سوخت کمتر از ۰/۵۷۵۹، سیستم با محرک موتور گازسوز نسبت به سیستم با محرک توربین گازی، دارای نسبت سوخت بیشتر و هزینهٔ کمتر است، اما برای مقادیر بیشتر از این نسبت سوخت حالت عکس اتفاق افتاده است.
- به‌علت بیشتربودن تعداد باتری و پنل خورشیدی برای محرک توربین گازی، هزینهٔ کلی سالیانه برای این محرک از سایر محرک‌ها بیشتر است.
- ظرفیت اسمی همهٔ محرک‌ها در محدودهٔ ۱۶۴-۱۶۳ کیلووات انتخاب شد.

واژه نامه

نسبت سوخت	Fuel ratio
هزینه سالیانه	Total annual cost
پنل فتوولتائیک	Photovoltaic panel
بهینه سازی	Optimization
تابع هدف	Objective function
جبهه پرتو	Pareto front
پارامترهای طراحی	Design parameters

فهرست علائم و اختصارات

ضریب هزینهٔ سالیانه x (-)	a
هزینهٔ سرمایه‌گذاری ($)	C_{in}
هزینهٔ نگهداری سالیانه ($/year)	C_m
نسبت سوخت (-)	FR
پرتو مستقیم (kW/m^2)	$\dot{I}_b$
پرتو پراکنده (kW/m^2)	$\dot{I}_d$
مجموع پرتو مستقیم و پرتو پراکنده (kW/m^2)	$\dot{I}_h$
جریان اتصال کوتاه (A)	I_{sc}
تصحیح دمای ولتاژ	f_{Voc_T}
تصحیح دمای جریان	f_{Isc_T}
نرخ تورم (-)	i
مصرف سوخت سالیانه در سیستم هیبریدی (kg/hour)	$M_{f,Hyb}$
مصرف سوخت سالیانه در سیستم سنتی (kg/hour)	$M_{f,Trad}$
سرعت ورودی باد (m/s)	V_c
سرعت خروجی باد (m/s)	V_f
سرعت نسبی باد (m/s)	V_r
سرعت باد (m/s)	V
هزینهٔ کلی سالیانه ($/year)	TAC
عمر دستگاه (year)	y
توان (kW)	P
توان الکتریکی نسبی (kW)	P_{er}

علائم یونانی

نرخ شارژ ساعتی خودکار	σ
بازده (-)	η
زاویهٔ سطح پنل (degree)	β
انعکاس از محیط (-)	ρ_g
ساعات عملکرد محرک (hour)	τ_{DE}
قیمت سوخت ($/kg)	φ_f
هزینهٔ انتشار گاز ($/kg$CO_2$)	Ψ_{CO_2}

زیرنویس‌ها

محیط	amb
باتری	Bat
بار مورد تقلضا	dmn
اینورتر	Inv
حداکثر	Max
نگهداری	m
پنل خورشیدی	PV
توربین بادی	WT

مراجع

1. Hu, Y., Morales, J. M., Pineda, S., Sánchez, M. J., and Solana, P., "Dynamic multi-stage dispatch of isolated wind-diesel power systems", *Energy Conversion and Management*, Vol.: 103, pp.605-615, (2015)
2. Basbous, T., Younes, R., Ilinca, A., and Perron, J. "Optimal management of compressed air energy

storage in a hybrid wind-pneumatic-diesel system for remote area's power generation", *Energy*, Vol. 84, pp. 267-278, (2015)

3. Diab, F., Lan, H., Zhang, L., and Ali, S., "An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery system", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 3884-3894, (2016).
4. Bilal, B. O., Sambou, V., Ndiaye, P. A., Kébé, C. M. F., and Ndongo, M., "Study of the Influence of Load Profile Variation on the Optimal Sizing of a Standalone Hybrid PV/Wind/Battery/Diesel System", *Energy Procedia*, Vol 36, pp.1265-1275, (2013).
5. Bilal, B. O., Sambou, V., Ndiaye, P. A., Kébé, C. M. F., and Ndongo, M., "Methodology to Size an Optimal Stand Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO2 Emissions", *Energy Procedia*, Vol. 14, pp.1636-1647, (2012).
6. Howlader, A. M., Izumi, Y., Uehara, A., Urasaki, N., Senjyu, T., Yona, A., and Saber, A. Y. "A minimal order observer based frequency control strategy for an integrated wind-battery-diesel power system", *Energy*, Vol. 46, pp. 168-178, (2012).
7. Merei, G., Berger, C., and Sauer, D. U. "Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm". *Solar Energy*, Vol. 97, pp. 460-473, (2013).
8. Kellogg, W. D., Nehrir, M. H., Venkataramanan, G., and Gerez, V. "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 13, pp. 70-75, (1998).
9. Gan, L. K., Shek, J. K., and Mueller, M. A. Optimization sizing of hybrid wind-diesel systems using linear programming technique, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on*, pp. 1‑6, (2014)
10. Kaldellis, J. K., Kondili, E., and Filios, A., "Sizing a hybrid wind‑diesel stand-alone system on the basis of minimum long-term electricity production cost", *Applied Energy*, Vol. 83, pp. 1384‑1403, (2006).
11. Saha, T. K., and Kastha, D. "Design optimization and dynamic performance analysis of a stand-alone hybrid wind‑diesel electrical power generation system", *IEEE Trans Energy Convers*. Vol. 25, pp. 1209‑1217, (2010)
12. Maleki, A., and Askarzadeh, A. Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran, *"Sustainable Energy Technologies and Assessments"*, Vol. 7, pp. 147-153, (2014).
13. Smith, C., Burrows, J., Scheier, E., Young, A., Smith, J., Young, T., and Gheewala, S. H. Gheewala, "Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island's diesel/PV/wind hybrid microgrid", *Renewable Energy*, Vol. 80, pp. 85-100, (2015).
14. Ma, X., Wang, Y., and Qin, J., "Generic model of a community-based microgrid integrating wind turbines, photovoltaics and CHP generations", *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 1475- 1482, (2013).
15. Sarrias-Mena, R., Fernández-Ramírez, L. M., García-Vázquez, C. A., and Jurado, F. Andrés García-Vázquez, F. Jurado., "Fuzzy logic based power management strategy of a multi-MW doubly-fed induction generator wind turbine with battery and ultracapacitor, *Energy*, Vol. 70, pp. 561-576, (2014).

16. Tsuanyo, D., Azoumah, Y., Aussel, D., and Neveu. P., "Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications", *Energy*, Vol. 86, pp. 152-163, (2015).
17. Sanaye, S., and Hajabdollahi, H., "4E analysis and multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA, proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *P I Mech. Eng. E-J Pro*., Vol. 228, No.1, pp. 43-60. (2013).
18. Rabbani, M., Dincer, I., and Naterer, G. F., "Thermodynamic assessment of a wind turbine based combined cycle", *Energy*, Vol. 44, pp. 321-328, (2012).
19. Maleki, A., and Pourfayaz, F., "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms", *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 471–483, (2015).
20. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A. M. T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, pp. 182 – 197, (2002).
21. Hajabdollahi, H., Ganjehkaviri, A., and Jaafar, M. N. M. "Thermo-economic optimization of RSORC (regenerative solar organic Rankine cycle) considering hourly analysis". *Energy*, Vol. 87, pp. 369-380, (2015).

۲۲. اداره ی هواشناسی استان کرمان، واحد تحقیقات و توسعه، کرمان.

Optimization of Hybrid Solar/Wind/Battery System with Different Prime Movers (Diesel Engine, Gas Engine, Gas Turbine)

Azadeh Ahmadi[1], Hassan Hajabdollahi[2]
Mohammad Shafiey Dehaj[3]

1. Introduction

Energy is the biggest challenge human beings are facing today. The energy used daily comes from burning fossil fuels. In fact, 81% of the world's energy consumption comes from fossil fuels such as oil, coal, and gas, which produce large volumes of CO2. In the traditional method, diesel generators were used alone in the power grid, which became economically obsolete due to rising oil prices. Recent advances in renewable energy technology have made it possible to use natural resources such as wind and solar. Combining renewable energy sources with diesel and energy storage systems are called hybrid renewable energy systems.

In this study, the solar-wind-battery hybrid system is modeled and then optimized with various primary actuators. For this purpose, three different actuators including diesel engine, gas engine, and gas turbine were used and the results for each of these actuators were examined separately. The number of solar panels, wind turbines and batteries, and the rated capacity of the main actuators are considered as design variables. Two optimization functions, cost and fuel ratio, were used. Fuel ratio is defined as a new objective function that shows the deviation of fuel consumption in this proposed system compared to a completely renewable system. It should be noted that to achieve an acceptable accuracy, all evaluations are performed hourly.

2. Modeling

In this study, the drives studied include diesel engine, gas engine and gas turbine, each of which was modeled separately. The number of solar panels, wind turbines, and batteries and the nominal capacity of diesel engine, gas engine, and gas turbine were considered as design variables. In the studied hybrid systems at any time, the amount of battery charge should be considered the total annual cost of the studied hybrid system such as equipment costs (including wind turbine, solar panel, battery, inverter, diesel engine, gas engine and gas turbine) and maintenance costs. The cost of stimulant fuel and the environmental cost are related to the pollutants produced by the stimuli.

Table 1. Input constraints and parameters for optimization

Parameter	value
Low turbine cutting speed (m / s)	2.5
High turbine cutting speed (m / s)	13
Rated turbine speed (m / s)	11
Hourly automatic discharge rate (-)	0.0002
Drainage depth (-)	0.8
Cost of pollutants ($ / kg)	0.2086
Nominal capacity of solar panel (kW)	0.24
Nominal capacity of wind turbine (kW)	10
Solar panel unit price ($)	614
Wind turbine unit price ($)	3200
Battery charge efficiency (-)	0.85
Battery discharge efficiency (-)	1
Inverter efficiency (-)	0.95

The total annual cost of the system was considered as one of the objective functions. Obviously, cost is always one of the most important characteristics of optimization in different energy systems. Since the cost of renewable systems is usually high, after optimization, the optimization algorithm will probably consider the number of solar panels, wind turbines and even batteries to be zero and all the required load will be supplied by the actuator. Therefore, in order to generalize the results, the amount of fuel consumed should also be considered. Hence, the fuel ratio is considered as the second objective function. In this study, the developed version of the genetic algorithm has been used by the authors written in MATLAB software. Solar-wind-battery hybrid system with diesel engine or gas engine or gas turbine for Kerman, was modeled and optimized. Input constraints and parameters are listed in Table 1.

3. Results

The NSGA-II multi-objective algorithm with 100 iterations was used to optimize the annual cost and fuel ratio. The best result is for a case with a lower annual cost and a higher fuel ratio. The results showed that with increasing fuel ratio, the annual

[1]. MSc. Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
[2] Associated Professor, Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
[3] Corresponding Author, Associated Professor, Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran. Email: m.shafiey@vru.ac.ir

cost increases. Increasing the fuel ratio means that the system is moving towards power generation without the use of actuators. On the other hand, the system must provide the required power by increasing the number of solar panels, wind turbines and batteries, which increases costs. The annual cost increases more rapidly, while the changes in the fuel ratio are very small. Optimal values of design parameters with objective functions for the optimal end point for different actuators are presented in table (2).

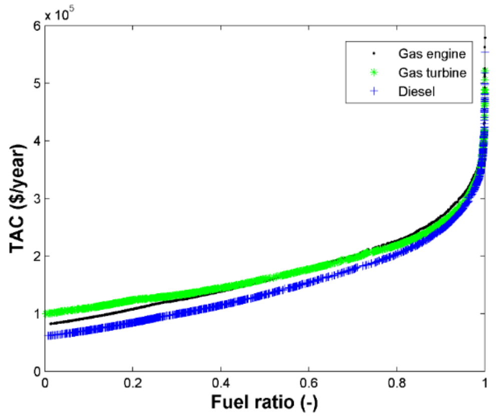


Figure 1. Optimal pareto front for different stimuli in a diagram

As shown in Figure 1, the diesel engine drive system has the lowest annual cost and the highest fuel ratio compared to the gas engine and gas turbine drive system. For fuel ratios less than 0.5759, the system with gas engine drive is dominant over the system with gas turbine drive, which means that it has a higher fuel ratio and lower annual cost, but for values higher than this, fuel ratio is the reverse mode.

Table 2. Optimal values of design parameters with objective functions for the optimal end point for different actuators

parameter	Gas Engine	Gas Turbine	Diesel
Fuel ratio (-)	0.708	0.777	0.735
Annual fee (($ / year)	202457.8	212910.9	185456.5
Number of solar panels (-)	1129	1390	1266
Number of wind turbines (-)	31	24	19
Rated capacity (kW)	164	164	163
Number of batteries (-)	814	910	822

4. Conclusion

In this paper, the solar-wind-battery hybrid system with various actuators including diesel engine, gas engine and gas turbine was optimized by NSGA-II multi-objective algorithm. It was done to select the appropriate actuator for the most efficient hybrid system. Fuel ratio and annual cost as target functions and number of solar panels, number of wind turbines, number of batteries, and nominal capacity of each actuator were considered as design parameters, the results of which are summarized as follows. A) Diesel-driven hybrid system has the highest fuel ratio and lowest cost compared to the other two systems in a wide range of beam fronts (about 99.74%); B) The optimal number of solar panels, wind turbines, and batteries for the hybrid system with diesel actuator is 1266, 19 and 822, respectively, and also the optimal nominal capacity of the diesel actuator is 163 kW; C) For fuel ratio less than 0.5759, the system with gas engine propulsion has a higher fuel ratio and lower cost than the system with gas turbine propulsion, but for values greater than this fuel ratio, the opposite situation occurred; D) Due to the large number of batteries and solar panels for the gas turbine actuator, the total annual cost for this actuator is higher than other actuators; E) The nominal capacity of all actuators in the range of 164-163 kW was selected.